

**Ганенко Л. Д.**

*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ  
Центральноукраїнський державний університет ім. В. Винниченка, Кропивницький*

**Жебка В.В.**

*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

### **АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАНЬ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ В ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

**Анотація:** На сьогоднішній день мобільна робототехніка є однією з галузей наукових досліджень, яка швидко розвивається. Завдяки широкому спектру можливостей мобільних роботів їх використання впроваджено в багатьох сферах: космічні дослідження, будівництво, транспорт, патрулювання, екстрено-рятувальні операції, промислова автоматизація, медицина, сфера послуг тощо. Дослідження навігації мобільних роботів стрімко прогресувало від руху роботів по фіксованій лінії до руху із розпізнаванням навколишнього середовища та пристосуванням до динамічних об'єктів, наприклад людей, що оточують роботів. У статті розглянуто проблематику навігації мобільних роботів в закритих приміщеннях. Описано взаємодію таких систем мобільних роботів як переміщення, сприйняття, пізнання та навігація. Проблеми переміщення вирішуються шляхом розуміння механізму та кінематики, динаміки та теорії управління. Сприйняття охоплює область аналізу сигналів датчиків. Когнітивні функції відповідають за аналіз вхідних даних і виконання відповідних дій мобільним роботом для досягнення цілей. Навігація вимагає знання алгоритмів планування, теорії інформації та штучного інтелекту для створення траєкторій руху у реальному часі та уникнення зіткнень з перешкодами. Для забезпечення узгодженої роботи ці системи мають бути об'єднані блоком керування. В роботі проаналізовано види мобільних роботів та їх архітектурні особливості. Розглянуто основні завдання навігації мобільних роботів: моделювання середовища, локалізація, планування шляху та уникнення перешкод. В статті досліджено алгоритми і методи локалізації мобільних роботів, наведено класифікацію методів планування шляху руху, проведено їх порівняльний аналіз. В процесі дослідження виявлено напрямки майбутніх досліджень: збільшення тривалості часу автономної роботи мобільних роботів; вдосконалення систем відстеження місцезнаходження мобільного робота у просторі; забезпечення оптимального прийняття рішень роботом в реальному часі; інтеграція нових сенсорів та вдосконалення існуючих; покращення функціональної взаємодії мобільних роботів з людьми.

**Ключові слова:** мобільні роботи, моделювання, навігація, локалізація, методи планування шляху, підтримка прийняття рішень, модель даних, інформаційна технологія, обробка даних, автоматизована система.

**Hanenko L.D.**

*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv  
Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi*

**Zhebka V.V.**

*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

### **ANALYTICAL REVIEW OF NAVIGATION ISSUES OF MOBILE ROBOTS IN INDOOR ENVIRONMENT**

**Abstract:** Today, mobile robotics is one of the fastest growing areas of scientific research. Thanks to the wide range of capabilities of mobile robots, their use has been implemented in many

areas: space exploration, construction, transportation, patrolling, emergency rescue operations, industrial automation, medicine, services, etc. The study of mobile robot navigation has rapidly progressed from robot movement along a fixed line to movement with environmental recognition and adaptation to dynamic objects, such as people surrounding the robots. The article deals with the problem of navigation of mobile robots in closed spaces. The interaction of such mobile robot systems as movement, perception, cognition, and navigation is described. The problems of movement are solved by understanding the mechanism and kinematics, dynamics, and control theory. Perception covers the area of sensor signal analysis. Cognitive functions are responsible for analyzing input data and performing appropriate actions by a mobile robot to achieve goals. Navigation requires knowledge of planning algorithms, information theory, and artificial intelligence to create real-time trajectories and avoid collisions with obstacles. To ensure coordinated operation, these systems must be united by a control unit. The paper analyzes the types of mobile robots and their architectural features. The main tasks of mobile robot navigation are considered: environment modeling, localization, path planning and obstacle avoidance. The article investigates algorithms and methods of localization of mobile robots, provides a classification of methods of path planning, and conducts a comparative analysis of them. The study identified areas for future research: increasing the battery life of mobile robots; improving systems for tracking the location of a mobile robot in space; ensuring optimal decision-making by a robot in real time; integrating new sensors and improving existing ones; improving the functional interaction of mobile robots with people.

**Keywords:** mobile robots, modeling, navigation, localization, path planning methods, decision support, data model, information technology, data processing, automated system.

## 1. Вступ.

Робототехніка є однією з технологій, яка стрімко розвивається завдяки конвергенції штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (ІОТ) та інших технологій Четвертої промислової революції (Індустрії 4.0).

У сфері промислових роботів поширюються симуляції за допомогою цифрових двійників, стрімко розвиваються технології, що імітують або моделюють дії людей управління роботами. Прогнозується, що робототехніка наступного покоління та пов'язані з нею технології відіграватимуть важливу роль для задоволення динамічних потреб інтелектуального виробництва в контексті Індустрії 4.0 та Промислового Інтернету речей (ПІОТ) [1]. В 2022 році обсяг продажів промислових роботів мав незначний приріст, однак їх товарна здатність стрімко зростає разом із розвитком індустрії електромобілів. Подальшому розвитку промислової робототехніки сприятимуть інвестиції в оснащення заводів нових електромобілів та збільшення потужності виробництва акумуляторів [1].

Через появу COVID-19 зросли світові потреби в безконтактних послугах та значно зросло використання сервісної робототехніки. Відповідно до звіту Міжнародної федерації робототехніки, очікується, що глобальний ринок сервісної робототехніки досягне 103,3 мільярдів доларів США до 2026 року, зростаючи зі зведеним річним темпом зростання (CAGR) на 23,3% [3].

Технологічний прогрес сприяв поширенню мобільних роботів в багатьох сферах людського життя, таких як виробництво, військова справа, сільське господарство та освіта [4]. Протягом останніх років простежується різке впровадження мобільних роботів, зокрема їх використовують для інспекції та контролю якості продукції, для виконання робіт в небезпечних умовах, для патрулювання та супроводу [5], для обслуговування людей із обмеженими можливостями [6, 7], для проведення екскурсій [8]. Таким чином, дослідження сфери мобільних роботів є перспективними та актуальними.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання навігації мобільних роботів у приміщенні викликали інтерес у дослідників протягом останніх десятиліть. Найперші алгоритми навігації роботів були розроблені у повністю відомому середовищі, наповненому нерухомими перешкодами, розташування яких також були відомі [9]. Наразі дослідники продовжують удосконалювати методи навігації в статистичних середовищах та розглядають

алгоритми планування безпечного руху мобільних роботів в умовах невизначеності [10], в динамічних середовищах [11] з використанням комп'ютерного зору [12], методів глибокого навчання [13], навчання з підкріпленням [14]. Незважаючи на чималу кількість опублікованих наукових робіт, все ще залишається необхідність в подальших дослідженнях та прикладних розробках.

**3. Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є аналіз та представлення комплексного огляду моделей і методів навігації мобільних роботів в приміщеннях та виявлення нових перспективних напрямків досліджень.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізувати існуючі види мобільних роботів;
- розглянути архітектурні особливості мобільних роботів;
- дослідити моделі та методи навігації мобільних роботів в приміщеннях;
- виявити поточні виклики та нові напрямки досліджень мобільних роботів в приміщеннях.

#### 4. Результати дослідження.

Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) визначено, що робот – це запрограмований приводний механізм із ступенем автономності для виконання переміщення, маніпуляцій або позиціонування.

Американський інститут робототехніки визначає робота як програмований, багатофункціональний маніпулятор, призначений для переміщення матеріалу, деталей, інструментів або спеціалізованих пристроїв за допомогою різних запрограмованих рухів для виконання різноманітних завдань.

Відповідно до визначення Японської асоціації робототехніки робот – це механічна система, яка має гнучкі функції руху, які властиві живим організмам, або поєднання таких функцій руху з інтелектуальними функціями, які можуть включати розпізнавання, адаптацію, навчання або будь-яку їх комбінацію [15].

Мобільні роботи (МР) – це роботи, які для виконання поставленого завдання змінюють власне розташування у середовищі. Автономний мобільний робот (АМР) – це система, яка працює в невідомому або частково невідомому середовищі самостійно, без явного зовнішнього управління [16]. АМР повинен мати можливість переміщуватись без збоїв і мати здатність уникати будь-яких перешкод у визначеному середовищі. АМР практично не потребує втручання людини при здійсненні свого переміщення, здатен спостерігати за навколишнім середовищем, на основі отриманої інформації приймати рішення та виконувати дії для досягнення поставлених перед ним цілей. АМР сконструйований таким чином, щоб слідувати заздалегідь визначеному шляху у різних середовищах.



Рис. 1. Схема керування системами мобільних роботів (адаптовано з [17])

Виокремлюють такі види середовищ руху МР:

- 1) заздалегідь відоме середовище, яке не змінюється під час руху робота (відоме статичне);
- 2) заздалегідь відоме середовище, яке може змінюватись (відоме динамічне);
- 3) невідоме та незмінне середовище (невідоме статичне);
- 4) невідоме середовище, яке може змінюватись (невідоме динамічне).

МР є інтеграцією таких систем: переміщення, сприйняття, пізнання та навігації. Схему керування системами мобільних роботів наведено на рис. 1.

#### 4.1. Переміщення мобільних роботів.

Система переміщення (locomotion) є важливою складовою мобільного робота. Вона залежить як від технічних критеріїв (маневреність, керованість, ефективність та стійкість) так і від шляху в середовищі руху МР (на землі, під водою, у повітрі тощо).

Класифікацію МР за способом переміщення в залежності від середовища руху подано на рис. 2.

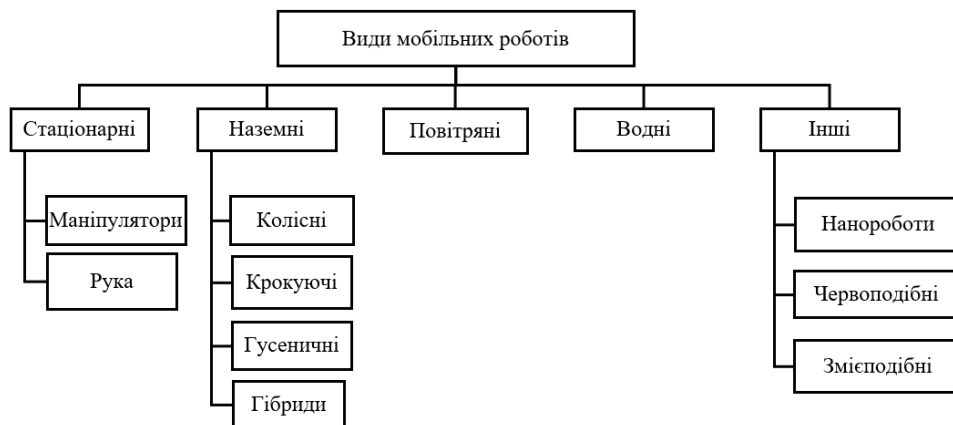


Рис. 2. Класифікація мобільних роботів за способом переміщення

Жоден із зазначених механізмів переміщень МР не є універсальним для використання у різних середовищах. В залежності від робочого середовища МР можна також класифікувати як внутрішнього (рух в приміщеннях) та вуличного (рух на вулиці). Мобільні роботи, які використовуються в приміщеннях, найчастіше оснащені ногами (крокуючі роботи) або колесами (колісні роботи).

Роботи, які переміщуються за допомогою ніг, мають високу мобільність та здатні долати досить значні перешкоди. Головна перевага крокуючих роботів – їхня здатність переміщуватись в місцях, які недоступні для колісних роботів.

В табл. 1 проаналізовано види крокуючих роботів, їхні переваги та недоліки.

Рух на колесах – один із найпопулярніших способів руху мобільних роботів. Колісні механізми ефективні завдяки своїй стабільності, простішій механічній конструкції та легкому управлінню. Роботи на колесах постійно контактують із поверхнею навколишнього середовища.

Під час використання МР у приміщенні важливим є питання маневреності робота. Маневреність – це здатність робота змінювати напрямок руху. Питання маневреності особливо гостро постає у випадку пересування у вузькому просторі. Робот характеризується хорошою маневреністю, якщо він має як можливість прямолінійного руху в будь-якому напрямку, так і можливість обертання на місці.

Таблиця 1.

## Порівняльний аналіз крокуючих роботів

Робот	Переваги	Недоліки	Застосування
Одноногий робот (хопер) [18]	здатний перестрибувати перешкоди; потрібно лише одна точка контакту з місцевістю; не потрібно здійснювати координацію ніг	ускладнена статична ходьба; ускладнена статична стабільність у нерухомому стані; потребує додаткового балансування	рух по сходах; рух у місцевості з перешкодами; рух при дослідженні небесних тіл
Двоногий робот [19]	здатний пересуватись по нерівній місцевості; уникнення перешкод шляхом переступання через них	потрібно враховувати розмір та вагу приводів при конструюванні; існує проблема динамічного балансу	пошуково-рятувальні завдання
Триногий робот [20] (робот-штатив)	має переваги в балансуванні під час руху та в статичному положенні; здатний змінювати напрямок руху	відсутній аналог в природі	перенесення важких вантажів
Чотириногий робот [15]	стабільний, коли не рухається; може переміщуватись в місцевості з різними рельєфами;	керування рухом ніг є більш складним; центр ваги робота повинен зміщуватись під час руху	військова сфера; рух у місцях, які є небезпечними для людини, в якості домашніх улюбленців
Шестиногий робот [22]	статична стабільність під час ходьби; підвищена маневреність; працездатність при пошкодженні 1-2 ніг	великі витрати енергоресурсів	рятувальні роботи в небезпечних місцях

Стабільність руху МР у приміщеннях менш важлива, оскільки поверхня має менше складних рельєфів, ніж ззовні. Двоколісні роботи можуть бути стійкими, якщо центр ваги

знаходиться безпосередньо під віссю колеса, але двоколісний робот може вдаритися об поверхню під час руху. Використання ж трьох і більше коліс гарантує стабільність руху МР. При створенні МР на чотирьох і більше колесах використовують систему підвіски, яка дозволяє всім колесам контактувати із нерівною поверхнею.

Дослідження колісних роботів зосереджені на проблемі вибору оптимальної кінематичної структури робота для конкретного застосування. Дана проблема пов'язана з підбором типів коліс, їх розташуванням, кількістю використаних приводів [23]. Розрізняють 4 типи коліс: стандартне, роликоне, шведське, сферичне.

В табл. 2 наведено основні характеристики зазначених типів коліс та проаналізовано їх переваги та недоліки.

При порівнянні колісних та крокуючих МР можна виокремити такі переваги колісних роботів: вони простіші в конструюванні, програмуванні та управлінні, мають зменшене споживання енергії, відсутні складні системи балансування. Недоліком колісних роботів є їх нездатність долати перешкоди в місцевості зі складним рельєфом.

Таблиця 2.

## Порівняльний аналіз типів коліс

Тип	Характеристика	Переваги	Недоліки
Стандартне колесо [24]	два ступені свободи; обертання навколо осі колеса та точки контакту	простота та надійність; стійкість на рівній поверхні; ідеальні для прямолінійних рухів	обмежений рух бічного ковзання; обмеженість маневрування у вузьких приміщеннях
Роликоне колесо [25]	два ступені свободи; поворот на $360^0$ навколо вертикальної осі	підвищена маневреність; плавний рух по гладкій поверхні	неефективність на м'яких та нерівних поверхнях; ефект флатеру (колесо не торкаючись землі обертається у непередбачуваному напрямку)
Шведське колесо (mecanum, omni) [24]	три ступені свободи; поворот навколо роликів, осі колеса та точки контакту	висока маневреність; рух в боковому напрямку; рух в будь-якому напрямку без розвороту	складність керування, порівняно зі стандартними колесами; висока вартість виготовлення
Сферичне колесо [26]	три ступені свободи; відсутня головна вісь обертання	висока маневреність в обмеженому просторі; розворот на місці;	складність конструкції, її обслуговування та керування; знижена вантажопідйомність;

#### 4.2. Сприйняття мобільних роботів.

Сприйняття (perception) МР — це здатність отримання інформації з навколишнього середовища та опрацювання отриманих даних для вивчення середовища, взаємодії та навігації. Через сприйняття МР розпізнають жести та голос людини, виявляють перешкоди та зміни в середовищі, класифікують місцевість.

МР отримують інформацію через датчики. Датчики, які використовують для збору даних, діляться на пропріоцептивні та екстероцептивні, а також на пасивні та активні [17].

Пропріоцептивні датчики призначені для вимірювання внутрішніх показників робота (барометр, одометр, гіроскоп) [29]. Екстероцептивні датчики працюють із зовнішніми показниками (ІЧ-камера, RGB та RGB-D камери, LIDAR) [30, 31]. Дані, які отримують з екстероцептивних датчиків використовуються для виділення основних характеристик середовища.

Пасивні датчики вимірюють енергію, яка надходить із середовища (наприклад датчики температури, мікрофон) [32]. Активні датчики випромінюють власну енергію в навколишнє середовище, а потім вимірюють реакцію (ультразвукові датчики, лазерні далекоміри). Можна окреслити декілька проблем, які можуть виникнути при використанні активних датчиків: вихідний сигнал датчиків може вплинути на результат вимірювання; сигнали можуть взаємодіяти зі схожими сигналами інших роботів або пристроїв, що може призвести до втрати точності та надійності вимірювань [17].

При проектуванні МР вибір та конфігурація датчиків залежить від завдань, які виконуватиме робот. У навігаційних системах сенсорна інформація може надходити від додаткових датчиків, резервних датчиків або навіть від одного датчика протягом певного періоду часу. Зменшення шуму, розширену гнучкість сенсорних можливостей і стійкість до відмов забезпечує сенсорний синтез [33]. Поширеними є такі методи сенсорного синтезу: правило Байєса, фільтр Калмана, приховані марковські моделі.

#### 4.3. Пізнання мобільних роботів.

Пізнання (cognition) – це здатність МР сприймати, розуміти та обробляти інформацію, яку він отримує про навколишнє середовище. Пізнання є ключовим аспектом для досягнення автономності та ефективного навігації мобільного робота [17].

Пізнання МР включає в себе такі техніки та алгоритми, як методи обробки зображень, алгоритми локалізації та картографування (SLAM), машинне навчання для виокремлення паттернів та прийняття рішень. Таким чином, когнітивний рівень робота – це частина прийняття рішень і їх виконання, яку робот використовує для досягнення цілей високого рівня.

#### 4.4. Навігація мобільних роботів.

Ключовим аспектом проектування МР є навігація (navigation).

За [34] навігація – це переміщення МР з одного місця в інше у відомому чи невідомому середовищі для досягнення бажаних цілей.

Можна виокремити чотири основних завдань навігації:

- 1) моделювання середовища (картографування);
- 2) локалізація (визначення точного положення МР на карті);
- 3) планування шляху;
- 4) уникнення перешкод.

Картографування та локалізація є взаємозалежними процесами: для локалізації МР необхідне існування карти, щоб порівняти дані спостережень середовища із модельованими даними, тоді як створення карти вимагає точної оцінки місцезнаходження МР. Дану проблему можна вирішити з допомогою одночасного визначення положення МР в середовищі і побудови карти цього середовища – SLAM. Більшість алгоритмів SLAM були

похідними від трьох основних: EKF-SLAM, FastSLAM та SLAM на основі графів. В [35] автори описують два ключові рішення SLAM за допомогою розширеного фільтра Калмана (EKF-SLAM) і за допомогою фільтрів Rao-Blackwellized частинок (FastSLAM).

#### 4.4.1. Моделювання навколишнього середовища.

Для визначення точного місцезнаходження МР потрібно розробити модель навколишнього середовища. Виділяють три основні методи представлення середовища: метричний (геометричний), топологічний та семантичний [36].

Метричне представлення середовища використовує координати для задання місцезнаходження МР та кінцевої точки переміщення. Карта середовища створюється у вигляді сітки точок, тоді траєкторія руху є послідовністю точок, яку МР має подолати, рухаючись від початкової до кінцевої точки.

Метричні моделі навколишнього середовища мають високу точність представлення об'єктів середовища і є зрозумілими для людини. Недоліком таких моделей є виникнення накопичувальних помилок місцезнаходження робота [37].

Топологічне представлення базується на чітких характеристиках відповідного середовища та містить вузли та дуги. Вузли – це локації, які МР може пройти, дуги – це з'єднання сусідніх вузлів. Дане представлення середовища використовує графи для моделювання середовища та застосовується у складних навігаційних завданнях [38].

Топологічне представлення має ряд переваг:

- не вимагає перетворення сенсорних даних у систему відліку 2D, необхідно лише зберегти інформацію сенсора про місцезнаходження;

- замість деталізованої геометричної карти середовища, робот оперує топологічною картою, яка відображає важливі топологічні відносини між різними областями, тому зменшується обчислювальне навантаження;

- під час змін середовища чи додавання нових об'єктів топологічну карту достатньо легко можна змінити.

В той же час сенсорні дані з визначеної локації будуть доступними лише, якщо МР фізично її відвідав. Тому для досягнення необхідної точності оцінки розташування МР потрібне дослідження із збільшеними витратами ресурсів, що є недоліком даного представлення.

Семантичне представлення визначається як розуміння об'єктів та їхніх відносин у середовищі на рівні семантики, тобто розуміння значень і призначення об'єктів. Семантична карта містить інформацію про сутності, тобто об'єкти, функції або події, які знаходяться в просторі [39]. Керування моделлю здійснюється за допомогою об'єктів та їх концепцій. При семантичному представленні МР співставляє дані, які він сприймає, з місцями, в яких він знаходиться. Зібрана інформація використовується для досягнення зазначеної цілі або для класифікації місця, в якому розташовані об'єкти.

Використовуючи семантичну навігацію МР здатний отримати необхідну інформацію із часткових знань про навколишнє середовище. Роботи з семантичним розумінням можуть приймати більш обґрунтовані рішення і ефективніше взаємодіяти з людьми та іншими роботами. Водночас точність даного представлення залежить від якості вхідних даних, яка може суттєво знижуватись в реальних умовах, та вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Порівнюючи вищерозглянуті представлення середовища, можна зазначити, що топологічне представлення дозволяє вирішувати складні навігаційні завдання та використовує моделі, подібні до людських. Семантичне представлення є найбільш близьким до когнітивних моделей людини, встановлює складні зв'язки між елементами середовища. Метричне представлення є найкращим для локальної навігації та точного планування шляху [36].

#### 4.4.2. Локалізація мобільного робота.



Локалізація МР (визначення точного положення і орієнтації мобільного робота) є ключовим елементом для автономної навігації, пошуку об'єктів, взаємодії з навколишнім середовищем і виконання різноманітних функцій в реальному часі. Процес локалізації МР включає використання різних сенсорів і технологій, таких як лазерні дальноміри, камери, акселерометри, гіроскопи, GPS. Робот використовує отримані дані для розрахунку свого поточного положення і планування свого майбутнього шляху.

У праці [17] виділяють три проблеми локалізації МР:

– Відстеження позиції. Для визначення поточного місцезнаходження МР необхідна інформація про його попереднє розташування. Відомим має бути і початкове розташування. При високій невизначеності позиції локалізація МР може бути неможливою. У [40] пропонують вирішити цю проблему за допомогою алгоритму планування завдань для активного збору інформації з системи сприйняття робота.

– Глобальна локалізація. Передбачають, що початкове розташування МР в середовищі є невідомим і він повинен самолокалізуватись. В роботі [41] дану проблему вирішують за допомогою сенсорного синтезу.

– Проблема «викраденого» робота. Дана проблема виникає, якщо МР «викрадають» і переміщують в інше місце. МР може бути відомо про його «викрадення», тоді вирішення проблеми зводиться до вирішення проблеми глобальної локалізації. Здатність локалізуватись після «викрадення» є необхідною умовою для будь-якого АМР.

Для вирішення завдань локалізації МР запропоновано методи з використанням фільтрів Калмана [42], локалізації на основі сітки Маркова [43], методи Монте-Карло [44] та комбінації цих методів [45].

#### **4.4.3. Планування шляху мобільного робота.**

Навігація МР передбачає планування оптимального маршруту від початкової точки до кінцевої відповідно до зазначеного критерію ефективності (мінімальний час, найменша потужність, гладкість, найкоротший шлях тощо).

Розглядають планування глобального шляху та локального шляху. При глобальному плануванні використовують такі методи як метод штучного потенційного поля, алгоритм Дейкстри, алгоритм  $A^*$ , метод клітинної декомпозиції. Під час локального планування інформація про середовище отримується від сенсорів МР. Поширеними алгоритмами локального планування є алгоритми нечіткої логіки, штучні нейронні мережі, ACO, PSO, GA, RRT.

Алгоритми планування шляху МР діляться на: класичні, евристичні та еволюційні.

До класичних методів належать метод клітинної декомпозиції (CD) [46], метод штучного потенційного поля (PF) [47], метод дорожньої карти (RA) (граф видимості [48], діаграма Вороного [49], метод ймовірнісної дорожньої карти (PRM) [50]). Класичні методи мають ряд недоліків. Наприклад, метод клітинної декомпозиції потребує великих обчислювальних ресурсів для аналізу робочого простору, використання методу штучного потенційного поля може призвести до потрапляння робота в пастки локальних мінімумів.

До евристичних алгоритмів належать алгоритми пошуку на основі графів. При застосуванні евристичних методів необхідно наперед знати середовище та початкову і кінцеву точку розташування робота. Найбільш поширеними евристичними алгоритмами є алгоритм Дейкстри [51],  $A^*$  алгоритм [52],  $D^*$  алгоритм [53].

Еволюційні (реактивні) методи використовують у невідомому динамічному середовищі. Такі алгоритми базуються на реакції, яка є біологічною реакцією на будь-яку дію. Для планування шляху МР використовують методи нечіткої логіки [54], алгоритм оптимізації рою частинок [55], штучні нейронні мережі [56], алгоритм штучної колонії бджіл [57], алгоритм оптимізації колонії мурах [58], генетичний алгоритм [59].

Класифікацію методів планування шляху МР зображено на рис.3.

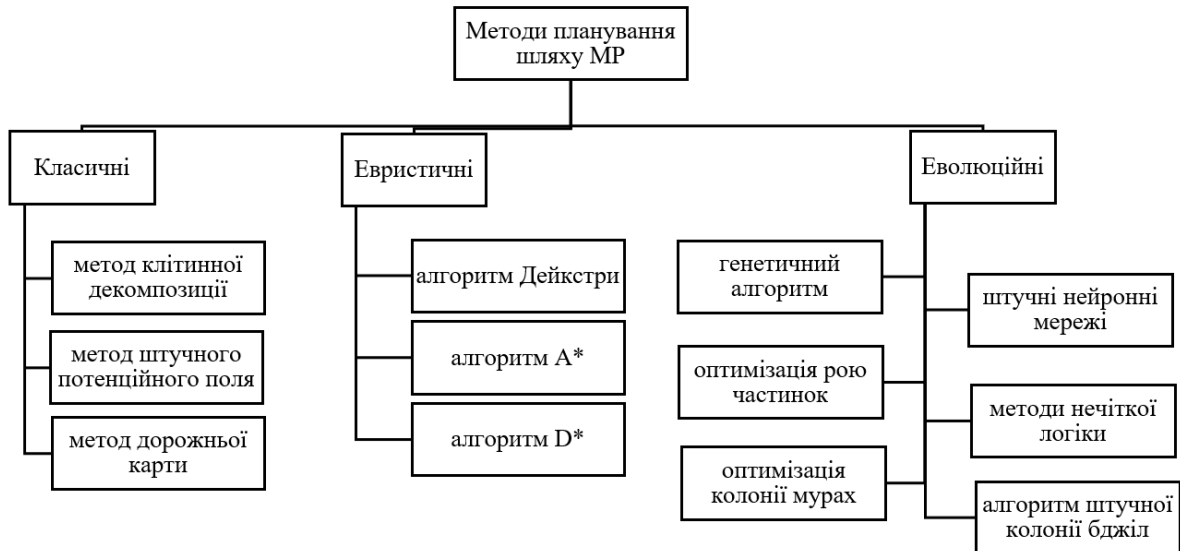


Рис. 3. Класифікація методів планування шляху МР.

#### 4.4.4. Уникнення перешкод.

Розробка швидкої та ефективної навігації мобільних роботів за наявності перешкод є однією з важливих проблем робототехніки. При глобальному плануванні траєкторії руху середовище є відомим, тому повний шлях робота можна розрахувати на основі попереднього знання координат початкової точки, точки призначення та перешкоди. У локальній навігації середовище навколо робота невідоме, тому для виявлення перешкод і уникнення зіткнення використовуються сенсорні дані. Методи локального планування руху вимагають менше попередніх знань про навколишнє середовище і скеровують робота відповідно до локально виявлених перешкод, тому такі методи є більш ефективними для МР, оскільки середовище може змінюватись у часі.

Для виявлення та уникнення перешкод використовують: алгоритм помилок (Bug Algorithm) [60], алгоритм векторного поля (VFH) [61], Bubble Band [62], метод швидкості викривлення [63], метод динамічного вікна [64], метод градієнта [66], новий гібридний навігаційний алгоритм (NHNA) [67], алгоритм на основі датчика зору [68]. Для уникнення статичних перешкод середовища високу ефективність мають алгоритм векторного поля та градієнтний метод, для уникнення динамічних перешкод використовують метод динамічного вікна. Ефективність методів може змінюватись залежно від конфігурації та розміру МР, програмного та апаратного забезпечення. Для отримання оптимальних уникнень перешкод використовують комбінації методів.

## 5. Висновки.

Мобільні роботи стають все більш популярними у багатьох секторах людського життя. Тому підходи до моделювання та керування МР повинні бути ефективними та здатними впоратись із будь-якою невизначеністю системи. В статті досліджено всі аспекти мобільного робота: переміщення, сприйняття, пізнання та навігація. Ці аспекти проаналізовано з точки зору питань інтеграції, математичного моделювання та критичних проблем.

Підбиваючи підсумки, можна виокреслити наступні напрямки майбутніх досліджень: збільшення тривалості часу автономної роботи МР; вдосконалення систем відслідковування місцезнаходження МР у просторі; забезпечення оптимального прийняття рішень МР в реальному часі; вдосконалення існуючих та інтеграція нових сенсорів; покращення функціональної взаємодії МР з людьми за допомогою різних засобів комунікації, таких як мовлення, розпізнавання жестів, облич та емоцій, взаємодія з сенсорами дотику.

**Список використаної літератури**

1. Lee, Ho & Enriquez, John Laurence & Lee, Geon. (2022). Robotics 4.0: Challenges and Opportunities in the 4th Industrial Revolution.
2. World Robotics. World robotics: Industrial robots 2022. Technical report, International Federation of Robotics (IFR) statistical department, (2022).
3. World Robotics. World robotics: Service robots 2022. Technical report, International Federation of Robotics(IFR) statistical department, (2022).
4. Anbalagan Loganathan, Nur Syazreen Ahmad. (2023) A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 40, 101343.
5. S. Gao, R. Song and Y. Li, (2018) Cooperative Control of Multiple Nonholonomic Robots for Escorting and Patrolling Mission Based on Vector Field, *in IEEE Access*, vol. 6, p. 41883-41891.
6. K. C. Okafor and O. M. Longe, (2022) WearROBOT: An Energy Conservative Wearable Obstacle Detection Robot With LP Multi-Commodity Graph, *in IEEE Access*, vol. 10, p. 105843-105865.
7. B. Zhang, M. Okutsu, R. Ochiai, M. Tayama and H. -O. Lim, (2023) Research on Design and Motion Control of a Considerate Guide Mobile Robot for Visually Impaired People, *in IEEE Access*, vol. 11, p. 62820-62828.
8. B. P. E. Alvarado Vasquez, R. Gonzalez, F. Matia and P. De La Puente, (2018) Sensor Fusion for Tour-Guide Robot Localization, *in IEEE Access*, vol. 6, p. 78947-78964.
9. R. Abiyev, D. Ibrahim, B. Erin, (2010) Navigation of mobile robots in the presence of obstacles, *Advances in Engineering Software*, vol. 41, p. 1179-1186.
10. Park, Jaesung. (2020) Real-time Robot Motion Planning Algorithms and Applications Under Uncertainty.
11. D. Jin, Z. Fang and J. Zeng, (2020) A Robust Autonomous Following Method for Mobile Robots in Dynamic Environments, *in IEEE Access*, vol. 8, p. 150311-150325.
12. Mahajan, Hemant & Uke, Nilesh & Pise, Priya & Shahade, Makarand & Dixit, Vandana & Bhavsar, Swapna & Deshpande, Sarita. (2022). Automatic robot Manoeuvres detection using computer vision and deep learning techniques: a perspective of internet of robotics things (IoRT). *Multimedia Tools and Applications*.
13. H. -T. L. Chiang, A. Faust, M. Fiser and A. Francis, (2019) Learning Navigation Behaviors End-to-End With AutoRL, *in IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, p. 2007-2014.
14. A. Antonucci, G. P. R. Papini, P. Bevilacqua, L. Palopoli and D. Fontanelli, (2022) Efficient Prediction of Human Motion for Real-Time Robotics Applications With Physics-Inspired Neural Networks, *in IEEE Access*, vol. 10, p. 144-157.
15. Gurjeet Singh, V.K. Banga. (2022). Robots and its types for industrial applications, *Materials Today: Proceedings*, vol. 60, p. 1779-1786.
16. Bekey G. (2005) Autonomous Robots — From Biological Inspiration To Implementation And Control. MIT Press, p. 577.
17. R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh and D. Scaramuzza, (2011), Introduction to Autonomous Mobile Robots, Cambridge, MA, USA:MIT Press, p. 472.
18. R. Tajima and K. Suga, (2006) Motion having a Flight Phase: Experiments Involving a One-legged Robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 1726-1731.
19. S. Feng, X. Xinjilefu, C. G. Atkeson and J. Kim, (2015) Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals, *IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Seoul, Korea (South)*, p. 1028-1035.

20. Cui, Haotian & Yang, Wang & Li, Qingqing & Yu, Yueqing & Ma, Lizheng & Wang, Yumo. (2013). A New Design of Three-Legged Robot of Mechanical and Control System. *Applied Mechanics and Materials*. 347-350.
21. P.M. James, Amal Prakash, Virbhadrappa Kalburgi, Pramod Sreedharan. (2021) Design, analysis, manufacturing of four-legged walking robot with insect type leg, *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, p. 4647-4652.
22. Soyguder, Servet & Alli, Hasan. (2007). Design and prototype of a six-legged walking insect robot. *Industrial Robot: An International Journal*. vol. 34. p. 412-422.
23. Trojnacki, Maciej & Dąbek, Przemysław. (2019). Mechanical Properties of Modern Wheeled Mobile Robots. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol.13, p. 3-13.
24. Tagliavini, L., Colucci, G., Botta, A. et al. (2022) Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies. *J Intell Robot Syst*, vol.106, p.57.
25. Medina, Oded, and Shlomi Hacohen. (2021) Overcoming Kinematic Singularities for Motion Control in a Caster Wheeled Omnidirectional Robot. *Robotics*, vol.10, p.133.
26. Navvabi, Hamed & Sadeghnejad, Soroush & Baltés, Jacky & Ramezani, Sepehr. (2017) Position control of the Single Spherical Wheel Mobile Robot by Using the Fuzzy Sliding Mode Controller (FSMC). *Advances in Fuzzy Systems*.
27. Premebida, Cristiano & Ambrus, Rares & Marton, Zoltan. (2018). Intelligent Robotic Perception Systems. *Mobile Robots*. vol.1, p.1-19.
28. T. Ran, L. Yuan, J.b. Zhang. (2021) Scene perception based visual navigation of mobile robot in indoor environment, *ISA Transactions*, vol. 109, p. 389-400.
29. Blanco, Jose Luis & González-Jiménez, Javier & Fernández-Madrugal, J.-A. (2007). Mobile robot ego-motion estimation by proprioceptive sensor fusion. *International Symposium on Signal Processing and its Applications 2007 (ISSPA07)*, p.1- 4.
30. Gorostiza, Ernesto Martín, José Luis Lázaro Galilea, Francisco Javier Meca Meca, David Salido Monzú, Felipe Espinosa Zapata, and Luis Pallarés Puerto. (2011) Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces. *Sensors*, no. 5, p. 5416-5438.
31. Bavle H, Sanchez-Lopez JL, Cimarelli C, Tourani A, Voos H. (2023) From SLAM to Situational Awareness: Challenges and Survey. *Sensors (Basel)*. vol. 23(10), p.4849.
32. Aqel, M.O.A., Marhaban, M.H., Saripan, M.I. et al. (2016) Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. *SpringerPlus* 5, 1897.
33. M. Kam, Xiaoxun Zhu and P. Kalata, (1997) Sensor fusion for mobile robot navigation, *in Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, p. 108-119.
34. Rubio F, Valero F, Llopis-Albert C. (2019) A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.;vol.16(2).
35. H. Durrant-Whyte and T. Bailey, (2006) Simultaneous localization and mapping: part I, *in IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, p. 99-110.
36. R. Barber, J. Crespo, C. Gomez, A. C. Hernamdez and M. Galli. (2018) Mobile Robot Navigation in Indoor Environments: Geometric Topological and Semantic Navigation. *Applications of Mobile Robots*, p. 1-25.
37. Salichs, Miguel & Moreno, Luis. (2000). Navigation of mobile robots: Open questions. *Robotica*. vol.18. p. 227-234.
38. M. B. Alatisé and G. P. Hancke. (2020) A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods, *in IEEE Access*, vol. 8, p. 39830-39846.
39. Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg. (2008) Towards semantic maps for mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, Issue 11, p. 915-926.
40. M. Colledanchise, D. Malafrente and L. Natale. (2020) Act perceive and plan in belief space for robot localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3763-3769.

41. Y. Chen, W. Chen, L. Zhu, Z. Su, X. Zhou, Y. Guan, et al. (2019) A study of sensor-fusion mechanism for mobile robot global localization, *Robotica*, vol. 37, no. 11, p. 1835-1849.
42. Q. Li, R. Li, K. Ji and W. Dai. (2015) Kalman Filter and Its Application. *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*, Tianjin, China, p. 74-77.
43. D. Fox, W. Burgard and S. Thrun. (1999) Markov localization for mobile robots in dynamic environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 11, p. 391-427.
44. F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun. (1999) Monte Carlo localization for mobile robots, *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2, p. 1322-1328.
45. Gutmann, J.-S., and Dieter Fox. (2002) An experimental comparison of localization methods continued. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, p. 454-459.
46. Debnath, Sanjoy & Omar, Rosli & Bagchi, Susama & elia nadira, Sabudin & Shee Kandar, Mohd Haris Asyraf & Foyso, K. & Chakraborty, Tapan. (2021). Different Cell Decomposition Path Planning Methods for Unmanned Air Vehicles-A Review. *Proceedings of the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology*, p.99-111.
47. Elia Nadira, Sabudin & Omar, Rosli & Hailma, Che Ku Nor. (2016). Potential field methods and their inherent approaches for path planning. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol.11, p.10801-10805.
48. El Khaili, M.. (2014). Visibility Graph For Path Planning In The Presence Of Moving Obstacles. *Engineering Science and Technology an International Journal*. vol. 4, p.118-123.
49. Garrido, Santiago & Moreno, Luis. (2006). Mobile Robot Path Planning using Voronoi Diagram and Fast Marching. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2376-2381.
50. Kavraki, Lydia & Svestka, Petr & Latombe, J.C. & Overmars, M.H.. (1996). Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*. vol.12, p. 566 - 580.
51. Alshammrei, Shaher & Boubaker, Sahbi & Kolsi, Lioua. (2022). Improved Dijkstra Algorithm for Mobile Robot Path Planning and Obstacle Avoidance. *Computers, Materials & Continua*, vol. 72, p. 5939-5954.
52. Akshay Kumar Guruji, Himansh Agarwal, D.K. Parsediya. (2016) Time-efficient A\* Algorithm for Robot Path Planning, *Procedia Technology*, vol. 23, p. 144-149.
53. Guo, Jianming & Liu, Liang. (2010). A study of improvement of D\* algorithm for mobile robot path planning in partial unknown environment. *Kybernetes*, vol. 39, p. 935-945.
54. Saroj Kumar Pradhan, Dayal Ramakrushna Parhi, Anup Kumar Panda, (2009) Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots, *Applied Soft Computing*, vol. 9, p. 290-304.
55. Sun, B. & Chen, Weidong & Xi, Y.-G. (2005). Particle swarm optimization based global path planning for mobile robots. vol. 20. p. 1052-1055.
56. Stephen Aylor, Luis Rabelo, Sema Alptekin, (1992) Artificial neural networks for robotics coordinate transformation, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 22, Issue 4, p. 481-493.
57. Marco A. Contreras-Cruz, Victor Ayala-Ramirez, Uriel H. Hernandez-Belmonte. (2015) Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming, *Applied Soft Computing*, vol. 30, p. 319-328.
58. Lei Wu, Xiaodong Huang, Junguo Cui, Chao Liu, Wensheng Xiao. (2023) Modified adaptive ant colony optimization algorithm and its application for solving path planning of mobile robot. *Expert Systems with Applications*, vol. 215.
59. Chaymaa Lamini, Said Benhlama, Ali Elbekri. (2018) Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, vol. 127, p. 180-189.
60. V. J. Lumelsky and T. Skewis. (1990) Incorporating range sensing in the robot navigation function, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 5, p. 1058-1069.
61. J. Borenstein and Y. Koren. (1991) The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots, *in IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, p. 278-288.

62. I. Susnea, V. Minzu and G. Vasiliu. (2009) Simple real-time obstacle avoidance algorithm for mobile robots, *Proc. 8th WSEAS Int. Conf. Comput. Intell. Man-Mach. Syst. Cybern. (CIMMACS)*, p. 24-29.
63. R. Simmons. (1996) The curvature-velocity method for local obstacle avoidance, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA*, vol. 4, p. 3375-3382.
64. LI, Xiuyun & LIU, Fei & LIU, Juan & LIANG, Shan. (2017). Obstacle avoidance for mobile robot based on improved dynamic window approach. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*. vol. 25. p. 666-676.
65. O. A. Abubakr, M. A. Jaradat and M. F. Abdel-Hafez. (2022) Intelligent Optimization of Adaptive Dynamic Window Approach for Mobile Robot Motion Control Using Fuzzy Logic, *in IEEE Access*, vol. 10, p. 119368-119378.
66. V. Dubey, B. Patel and S. Barde. (2023) Path Optimization and Obstacle Avoidance using Gradient Method with Potential Fields for Mobile Robot. *2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS), Coimbatore, India*, p. 1358-1364.
67. Zohaib, Mohammad & Pasha, Mustafa & Riaz, Raja Ali & Javaid, Nadeem & Ilahi, M. & Khan, Rahim. (2013). Control Strategies for Mobile Robot With Obstacle Avoidance. *Journal of Basic and Applied Scientific Reseach*, vol. 3. p. 1027-1036.
68. Kim, Pil & Park, Chang & Jong, Yun & Yun, Jea & Mo, Eun & Kim, Chin-Su & Jie, Min & Hwang, Soo & Lee, Kang. (2007). Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Using Vision System and Ultrasonic Sensor. *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, vol. 15, p. 545-553.